

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 629.7

### Перспективы развития и инновационные подходы проектирования внешней обшивки самолета

**Е.В. Малая, К.Л. Веденева**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

#### Аннотация

Исследуется влияние структуры, состава и обработки композитов на механические свойства и долговечность обшивки гражданских самолетов для выявления факторов надежности и разработки рекомендаций по проектированию. Проведен анализ функционального назначения, существующих материалов, конструкций, методов соединения, перспектив развития, включая обшивку с углублениями типа «димплов» для улучшения аэродинамики. Обнаружено преимущество композитов в прочности-весе, усталостной стойкости, коррозионной защите; углубления снижают сопротивление, шум, риск обледенения, оптимизируя топливную эффективность. Сделан вывод о перспективности композитов с инновационной текстурой и адаптивными структурами для авиации будущего. Результаты важны для создания легких, надежных конструкций, снижения затрат; статья предлагает практические решения, требующие полного ознакомления.

**Ключевые слова:** внешняя обшивка, аэродинамика, конструкция самолета, алюминиевые сплавы, композиционные материалы, усталость, коррозия, самовосстанавливающиеся материалы

**Для цитирования.** Малая Е.В., Веденева К.Л. Перспективы развития и инновационные подходы проектирования внешней обшивки самолета. *Молодой исследователь Дона*. 2026;11(2):49–53.

### Development Prospects and Innovative Approaches to Aircraft Skin Design

**Elena V. Malaya, Ksenia L. Vedeneva**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

#### Abstract

The article studies the influence of composite materials' structure, composition, and processing technologies on the mechanical properties and durability of the fuselage skin of civil aircrafts aiming to identify the reliability-fostering factors and develop design recommendations. Aircraft skin functional purpose, existing materials and structures, joining techniques, and prospects for development, such as fuselage skin dimpling, have been analysed. The advantages of composite materials with regard to strength-weight ratio, fatigue strength endurance, and corrosion protection have been identified, as well as ability of dimples to reduce drag, noise, and the risk of icing, thus, optimize fuel efficiency. A conclusion about potential of adaptive composite structures with innovative textures for future aviation has been ascertained. The research results are important for creating the lightweight, reliable structures and reducing the costs; the article suggests practical solutions that require a comprehensive study.

**Keywords:** fuselage skin, aerodynamics, aircraft structure, aluminum alloys, composite materials, fatigue, corrosion, self-healing materials

**For Citation.** Malaya EV, Vedeneva KL. Development Prospects and Innovative Approaches to Aircraft Skin Design. *Young Researcher of Don*. 2026;11(2):49–53.

**Введение.** Обшивка самолета представляет собой ключевой конструктивный элемент, определяющий основные характеристики воздушного судна. Она формирует внешние кон фюзеляжа, обеспечивает жесткость, прочность и герметичность, воспринимает внешние нагрузки, а также предохраняет от неблагоприятных факторов окружающей среды. Исторически эволюция материалов и конструктивных решений обшивки — от деревянных каркасов с тканью до высокотехнологичных композитов — отражает прогресс всей авиации. Качество

и характеристики обшивки напрямую влияют на полетные данные, безопасность, комфорт экипажа и пассажиров, а также эксплуатационные расходы. Вместе с тем внедрение инновационных материалов и технологий порождает новые инженерные вызовы: расчет напряженно-деформированного состояния, выбор рациональных способов изготовления, оценку надежности и ресурса конструкций.

Целью исследования служит всесторонний анализ влияния структуры, состава и режимов обработки композитов на механические свойства и ресурс обшивки современных гражданских самолетов. Работа ориентирована на выявление условий, гарантирующих высокую надежность и долговечность композитов, а также на создание прогрессивных вариантов внешней обшивки с рекомендациями по совершенствованию проектирования и производства.

**Основная часть. Функциональное назначение.** В современной авиации обшивка выступает активной составной частью несущей конструкции. В наиболее распространенной полумонококовой схеме она совместно со стрингерами и шпангоутами (нервюрами) воспринимает осевые, сдвиговые и изгибающие воздействия. В монококовой схеме обшивка несет основную нагрузку. Обшивка ограждает внутренние системы самолета (электропроводку, гидравлику, топливные баки, бортовое оборудование) от агрессивных внешних факторов: осадков (дождя, града, снега), пыли, ультрафиолета, температурных колебаний, механических повреждений (от ударов птиц, ледяных частиц, контактов с наземным оборудованием). Кроме того, она обеспечивает защиту от прямого молниестрала с рассеиванием заряда. В герметизированных отсеках (кабина экипажа, пассажирский салон) обшивка поддерживает требуемый перепад давления с атмосферой на высотах полета, что жизненно важно для комфорта и безопасности. Обшивка также способствует шумоизоляции салона [1].

**Существующие решения.** Выбор материала внешней обшивки обусловлен компромиссом характеристик: прочности, жесткости, усталостного ресурса, коррозионной стойкости, массы, технологичности и цены.

Десятилетиями алюминиевые сплавы доминировали в обшивках большинства самолетов. Распространены серии 2xxx с медью (Cu) как главным легирующим элементом (например, Д16 (2024) с высокой прочностью и вязкостью) и 7xxx с цинком (Zn) (например, В95 (7075), 7050, 7055 — с экстремальной прочностью, особенно 7055, но меньшей коррозионной стойкостью и усталостным пределом, чем у 2xxx) [2]. К их достоинствам относятся благоприятное удельное прочностное соотношение, хорошая обрабатываемость, свариваемость отдельных марок, доступная цена, ремонтпригодность, высокая электропроводность (защита от молний); недостатки — склонность к усталости и коррозии (межкристаллитной, расслаивающей), потребность в регулярном контроле и обслуживании.

В последние годы активно замещают металлы композиционными материалами, прежде всего углепластиками (CFRP — Carbon Fiber Reinforced Polymer). Широко применены на Boeing 787 Dreamliner, Airbus A350 XWB, Airbus A220 (Bombardier CSeries) [3]. Углепластики превосходят алюминий удельными прочностью и жесткостью, усталостным ресурсом (усталость минимальна), коррозионной стойкостью, позволяют интегрировать сложные формы; минусы — дороговизна материалов и изготовления, трудности неразрушающего контроля дефектов (расслоений), низкая ударная вязкость, сложный ремонт, малая электропроводность (нужны меры против молний), обязательная кромочная защита от расслоения.

Титановые сплавы задействуют там, где требуется жаропрочность и прочность: на обшивках высокоскоростных машин (МиГ-25, SR-71 Blackbird) с нагревом поверхностей до сотен градусов Цельсия или в местах крепления двигателей. Они прочны, жаростойки, коррозионностойки, но дороги и трудны в обработке [4].

**Конструктивные решения и методы соединения.** Доминирующая схема силовых конструкций фюзеляжа и крыла — полумонокок. Здесь обшивка совместно с продольными (стрингерами) и поперечными (шпангоутами/нервюрами) элементами образует монолитную жесткую структуру, совместно работающую на нагрузки [5].

**Методы соединения обшивки с каркасом и элементов между собой.** Традиционно преобладает клепка. Она надежна, проверяема визуально, но заклепки концентрируют напряжения, снижают усталостный ресурс, утяжеляют конструкцию, удорожают сборку (много сверления). Для аэродинамики применяют потайную клепку [6].

Бондинг (клеепрокладка) набирает популярность, особенно для композитов и гибридов металл-композит. Он равномерно распределяет напряжения, минимизирует концентраторы, дает гладкость (меньше сопротивления), облегчает, повышает усталостный предел; но требователен к подготовке поверхности, полимеризации, неразрушающему контролю, чувствителен к нагреву [7].

Сварка применяется реже — для алюминия (точечная) и титана. Она строгая по режимам, чревата деформациями и ослаблением шва. Новинки вроде трения с перемешиванием (Friction Stir Welding) расширяют перспективы [8].

Тенденция — крупноразмерные панели, цельноформованные или сбондированные с интегрированными стрингерами и нервюрами. Это сокращает детали и стыки, снижая массу и трудоемкость, но требует сложного оборудования [9].

**Перспективные направления развития.** Циклические нагрузки (взлеты/посадки, перепады давления, турбулентность) вызывают в металлической обшивке микротрещины. Регулярный мониторинг и ремонт (накладки, замена панелей) предотвращают аварии. Композиты устойчивее к усталости, но уязвимы к другим дефектам [10]. Алюминиевые сплавы подвержены различным видам коррозии (гальваническая, межкристаллитная, расслаивающая), особенно в местах контакта разнородных металлов, в условиях повышенной влажности и воздействия агрессивных сред (соленая вода, антиобледенительные жидкости). Коррозия снижает прочность и требует дорогостоящего обслуживания [11].

Обшивка подвержена механическим повреждениям: удары птиц, града, камней при взлете/посадке, повреждения наземным оборудованием, случайными столкновениями с объектами в аэропорту. Для композитов это может проявляться в виде расслоений (деламинаций), которые трудно обнаружить визуально и которые существенно снижают несущую способность материала.

В обшивке высокоскоростных самолётов и вблизи двигателей возникают значительные термические напряжения, требующие применения жаропрочных материалов. Шум от двигателей и аэродинамический шум могут вызывать акустическую усталость обшивки, а также обуславливают необходимость применения звукопоглощающих материалов для обеспечения комфортного уровня шума в кабине пассажиров [12].

Стремление снизить массу самолёта для повышения топливной эффективности постоянно стимулирует разработку новых, более лёгких материалов и конструктивных решений — что, однако, часто сопровождается увеличением производственных затрат [13]. Современное развитие технологий внешней обшивки самолёта сосредоточено на повышении её функциональности, снижении массы, увеличении долговечности и уменьшении эксплуатационных расходов.

Рассмотрим концепцию обшивки самолёта будущего с поверхностью, подобной поверхности мяча для гольфа. Это перспективный подход к улучшению аэродинамических характеристик, вдохновлённый биомиметикой. Мячи для гольфа обладают впадинами (димплами), которые существенно уменьшают сопротивление воздуха при полёте. Применение аналогичной текстуры на обшивке самолёта может дать ряд преимуществ, но также сопряжено с определёнными ограничениями. Исследователи из Мичиганского университета показали, что покрытие корпуса воздушного судна вмятинами по образцу димплов мяча для гольфа может повысить манёвренность и энергоэффективность летательного аппарата. Результаты исследования опубликованы в журнале Flow [14].

Физика димплов: обтекание мяча формирует пограничный слой — зону градиента скоростей от нуля у поверхности до полной. Димплированный мяч летит на 30 % дальше гладкого за счет снижения сопротивления.

Микротекстура обшивки дает уменьшение сопротивления на крейсерских режимах, а также оптимизацию обтекания фюзеляжа и крыла. Димплы турбулизируют пограничный слой, отодвигая отрыв назад, снижая сопротивление и расход топлива, особенно при больших углах атаки. Турбулентность слегка усилит подъем, позволяя меньшую скорость или большую нагрузку. Углубления приглушат шум, ускорят сход воды и льда, но в отдельных зонах обледенение усугубится.

Нанесение миллионов прецизионных димплов — технологический вызов, решаемый 3D-печатью или аддитивными методами (рис. 2).



Рис. 2. Модель обшивки самолета с углублениями для улучшенной аэродинамики

Углубления обшивки должны обладать достаточной прочностью, чтобы выдерживать механические напряжения полёта, экстремальные температуры и воздействие внешней среды — это потребует применения новых композитных материалов с высокой прочностью и износостойкостью. Углубления могут аккумулировать грязь и насекомых, что ухудшает аэродинамические характеристики и требует более частой очистки. Ремонт повреждённых участков с впадинами существенно сложнее, чем восстановление гладкой поверхности — потребуются разработка новых методов ремонта и технологий. Впадины способны влиять на работу смежных систем самолёта, в том числе антенн и датчиков; поэтому важна совместимость обшивки с этими системами.

Для реализации проекта целесообразно рассмотреть следующее решение. Для упрощения внедрения технологии и минимизации рисков рекомендуется начать с частичного покрытия отдельных зон самолёта такими структурами. Например, размещение структурированных углублений преимущественно на боковой части фюзеляжа позволит снизить сложность изготовления и обслуживания, при этом сохранив значительную долю ожидаемого эффекта по уменьшению сопротивления и уменьшению проблем при обледенении.

Различные формы и размеры углублений на поверхности обшивки применяются для улучшения аэродинамических характеристик. Рассмотрим следующие типы углублений:

1. Микроскопические впадинки на поверхности снижают турбулентность потока воздуха вокруг фюзеляжа и крыльев, уменьшая аэродинамическое сопротивление. Это снижает суммарную нагрузку на воздушное судно и повышает топливную эффективность. Применение микроуглублений наиболее эффективно на высокоскоростных самолётах.

2. Углубления типа канавок формируют направленное течение воздуха вдоль заданных направлений, стабилизируя поток, предотвращая образование нежелательных завихрений и уменьшая сопротивление. Такая конструкция особенно полезна для управления набегающим воздухом в зоне стыка крыла и фюзеляжа, повышая устойчивость и управляемость самолёта.

Использование различных форм и размеров углублений позволяет существенно улучшить лётно-технические характеристики самолётов, повышая топливную экономичность, стабильность полёта и безопасность эксплуатации. Учитывая важность оперативного восстановления повреждённой поверхности, особое внимание следует уделять разработке методов локальной реставрации элементов обшивки, обеспечивающих быстрое восстановление характеристик покрытия без полного демонтажа деталей самолёта.

Процедура нанесения противобледенительной жидкости на корпус самолёта с рельефной поверхностью включает несколько этапов подготовки и нанесения состава. Поверхность с впадинами необходимо тщательно инспектировать и очищать от загрязнений, остатков предыдущих обработок и механических повреждений. Особое внимание уделяется углублениям — в них накапливаются загрязнения и ледяные частицы. Для равномерного распределения состава выбирают соответствующие методы распыления или кистевого нанесения с учётом геометрии поверхности и глубины углублений.

Последовательность нанесения обычно следующая:

- предварительное нанесение тонкого слоя, проникающего в углубления и обеспечивающего первичную защиту от образования льда; этот этап заполняет мелкие поры и улучшает адгезию последующих слоёв;
- после высыхания первого слоя — нанесение основного защитного слоя; жидкость распыляют так, чтобы покрыть всю поверхность равномерно, включая кромки углублений; толщина основного слоя определяется условиями окружающей среды и ожидаемой длительностью воздействия неблагоприятных факторов;
- при необходимости — нанесение дополнительного тонкого финишного слоя для повышения гидрофобности и долговечности покрытия.

По завершении нанесения поверхность осматривают визуально и с помощью специализированного оборудования для обнаружения дефектов покрытия; выявленные недостатки устраняют повторным нанесением состава.

Таким образом, внедрение обшивки самолёта, аналогичной структуре мяча для гольфа, демонстрирует значительный потенциал повышения энергоэффективности авиационной техники и должно рассматриваться производителями и конструкторами как одно из перспективных направлений инновационного развития отрасли [15]. Использование поверхности, подобной мячику для гольфа, на обшивке самолёта — перспективная идея в аэродинамике, однако её реализация связана с решением серьёзных технологических и инженерных задач. Успешная разработка и внедрение такой технологии способны обеспечить улучшенные лётные характеристики, повышенную экономичность и снижение уровня шума, но потребуют значительных инвестиций в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы [16].

**Заключение.** Проведён комплексный анализ влияния структуры, состава и методов обработки композитных материалов на механические свойства и долговечность обшивки гражданских самолётов нового поколения. Изучены ключевые факторы, определяющие надёжность и срок службы композитных конструкций, и предложены рекомендации по проектированию и изготовлению современной авиационной обшивки. Полученные результаты подтверждают перспективность перехода от традиционных металлов к композитам с улучшенными характеристиками прочности, долговечности и ремонтпригодности. Особое внимание уделено применению инновационных технологий поверхностной обработки и внедрению рельефных углублений на внешней обшивке самолёта, способствующих снижению массы конструкции, уменьшению сопротивления воздушным потокам, повышению аэродинамических качеств и манёвренности воздушного судна. Исследования также выявили потенциал создания «умных» и адаптивных структур в сочетании с современными производственными методами, включая аддитивные технологии — такие решения позволяют разработать новые типы обшивки, способные самостоятельно диагностировать повреждения и восстанавливать целостность, что существенно повысит надёжность и эффективность эксплуатации авиационной техники будущего. В результате выполненная работа решила поставленные задачи, подтвердив важность развития композитных материалов и современных производственных подходов и открыв путь к созданию будущих поколений лёгких, надёжных и эффективных авиационных конструкций.

**Список литературы**

1. Вогинова Е.Б., Шалимов М.П., Фивейский А.М. *Основы технологической подготовки производства*. Учебное пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета; 2017. 172 с. URL: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/54004/1/978-5-7996-2171-1\\_2017.pdf?ysclid=miyls3nz1w693566651](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/54004/1/978-5-7996-2171-1_2017.pdf?ysclid=miyls3nz1w693566651) (дата обращения: 18.02.2026).
2. *Марки алюминия и их применение*. LazerMetal. URL: <https://www.lazermetal.ru/info/articles/poleznye-stati/marki-alyuminiya-i-ikh-primeneniye/?ysclid=miyj6kacbi825622579> (дата обращения: 18.02.2026).
3. *Что такое углепластик (CFRP)*. InnerEngineering. URL: <https://inner.su/articles/ugleplastik-cfrp-eto-polimernyy-kompozit-na-osnove-uglerodnykh-volonok-obladaet-vysokoy-prochnostyu-/?ysclid=miyjs59qn9420972516> (дата обращения: 15.12.2025).
4. *Что такое титановые сплавы*. InnerEngineering. URL: <https://inner.su/articles/titanovye-splavy-eto/?ysclid=miyjjvq9md381127114> (дата обращения: 15.12.2025).
5. Антипов В.В., Сидельников В.В., Самохвалов С.В., Шестов В.В., Нефедова Ю.Н., Лялин А.А. Возможности применения слоистого алюмокомпозита в обшивке фюзеляжа самолета. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016;18(1):77–82.
6. *Полное руководство по заклепкам: типы заклепок и процессы клепки*. Tuofa. URL: <https://www.tuofa-cncmachining.com/ru/tuofa-blog/rivets-types-riveting-processes.html> (дата обращения: 18.02.2026).
7. *Композитные материалы в машиностроении: применение*. InnerEngineering. URL: <https://inner.su/articles/kompozitnye-materialy-v-mashinostroenii-primeneniye/?ysclid=miyjk7pd5cg223917778> (дата обращения: 18.02.2026).
8. *Сварка алюминия и алюминиевых сплавов*. Родат. URL: <https://gazmaf.by/info/svarka-aluminiya-i-aluminiyevyh-splavov.aspx?ysclid=miykbfgngi503565463> (дата обращения: 18.02.2026).
9. Тарасов Ю.Л., Лавров Б.А. *Расчет на прочность элементов конструкции самолета*. Самара 2000., 112 с. URL: <https://studfile.net/preview/21453939/> (дата обращения: 18.02.2026).
10. *Что такое усталостная прочность ПКМ*. InnerEngineering. URL: <https://inner.su/articles/ustalostnaya-prochnost-pkm-eto-soprotivlenie-kompozita-razrusheniya-pri-tsiklicheskikh-znakoperemenn/?ysclid=miykeigm9o187708029> (дата обращения: 15.12.2025).
11. *Основные виды коррозии алюминия*. VTM. URL: <https://vtmstol.ru/blog/korroziya-alyuminiya?ysclid=miykgobhsg234131828> (дата обращения: 15.12.2025).
12. Кузнецов В.М. Эффективность методов снижения шума. Реактивных струй двигателей пассажирских самолетов. *Акустический журнал*. 2010;56(1):91–102. URL: [http://akzh.gpi.ru/pdf/2010\\_1\\_91-102.pdf](http://akzh.gpi.ru/pdf/2010_1_91-102.pdf) (дата обращения: 15.12.2025).
13. Vilumbrales-García R, Sudarsana PB, Sareen A. Adaptive Drag Reduction of a Sphere Using Smart Morphable Skin. *Flow*. 2025;5:E17. <https://doi.org/10.1017/flo.2025.7>
14. Казьмина И.В., Сафин А.М., Щеголева Т.В. Основные направления совершенствования информационных систем управления авиационными предприятиями на основе использования современных компьютерных и информационных технологий. *Организатор производства*. 2017;25(1):36–46.
15. Вялов А.В. *Основы технологии производства самолетов*. Учебное пособие. 2-е изд., доп. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ»; 2013. 145 с. URL: [https://knastu.ru/media/files/page\\_files/page\\_421/posobiya\\_2013/Vyalov\\_Osnovy\\_tekhnologii\\_proizvodstva\\_samoletov.pdf?ysclid=miylajkgsh143132319](https://knastu.ru/media/files/page_files/page_421/posobiya_2013/Vyalov_Osnovy_tekhnologii_proizvodstva_samoletov.pdf?ysclid=miylajkgsh143132319) (дата обращения: 18.02.2026).
16. *Мячи для гольфа помогут снизить сопротивление самолетов*. N+1. URL: <https://nplus1.ru/news/2017/01/27/drag?ysclid=miyl759btg245207683> (дата обращения: 18.02.2026).

**Об авторах:**

**Елена Викторовна Малая**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [elvicma@mail.ru](mailto:elvicma@mail.ru)

**Ксения Леонидовна Веденева**, магистрант кафедры «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [vedeneevakl@yandex.ru](mailto:vedeneevakl@yandex.ru)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Authors:**

**Elena V. Malaya**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [elvicma@mail.ru](mailto:elvicma@mail.ru)

**Ksenia L. Vedeneva**, Master's Degree Student of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [vedeneevakl@yandex.ru](mailto:vedeneevakl@yandex.ru)

**Conflict of Interest Statement:** the authors declare no conflict of interest.

**All authors have read and approved the final manuscript.**